

DOI: 10.3901/JME.2019.02.147

地铁钢轨滚动接触疲劳损伤研究*

梁喜仁¹ 陶功权¹ 陆文教² 关庆华¹ 温泽峰¹

(1. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都 610031;

2. 广州地铁集团有限公司 广州 500330)

摘要: 钢轨滚动接触疲劳损伤在地铁线路上较为常见。建立包含地铁车辆系统动力学模型、基于安定图的疲劳指数和基于磨损数的损伤函数为一体的钢轨滚动接触疲劳预测模型,分析车辆在通过三种典型曲线时钢轨的受力状态、接触点位置和损伤情况。研究表明,车辆通过曲线时低轨侧钢轨蠕滑力的合力指向直角坐标系的第四象限,接触点主要位于轨顶区域;高轨侧钢轨蠕滑力的合力主要指向直角坐标系的第三象限,接触点主要位于高轨内侧轨距角处。钢轨表面疲劳指数大于 0 的概率较大,材料易处于棘轮效应区,同时根据损伤函数得到钢轨的损伤值大于 0,即属于疲劳裂纹损伤。容易导致钢轨表面在轮轨常接触区产生与蠕滑力合力方向相垂直的裂纹,其方向与现场观察到的裂纹方向相一致。随着曲线半径的减小,轮轨蠕滑力合力显著增大。磨损后的车轮和磨损后的钢轨在小半径曲线上频繁地相互作用,易使钢轨材料产生棘轮效应,是导致钢轨表面产生裂纹和剥离掉块的主要原因。

关键词: 轮轨关系; 钢轨滚动接触疲劳; 疲劳指数; 损伤函数; 蠕滑力

中图分类号: U211

Study on the Rail Rolling Contact Fatigue of Subway

LIANG Xiren¹ TAO Gongquan¹ LU Wenjiao² GUAN Qinghua¹ WEN Zefeng¹

(1. Traction Power State Key Laboratory, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031;

2. Guangzhou Metro, Guangzhou 500330)

Abstract: Rail rolling contact fatigue (RCF) is a common problem in subway lines. In this paper a RCF prediction model is established, including vehicle system dynamics model, fatigue index based on the shakedown map and rail damage function based on the wear number. The wheel/rail creep force, wheel/rail contact positions and rail RCF are analyzed when the vehicle operates on three typical kinds of curved tracks. The results show that when the vehicle passes through the curved track, the resultant creep forces on the low rail point to the fourth quadrant of the Cartesian coordinates system, while on the high rail they mainly point to the third quadrant of the Cartesian coordinates system. The fatigue index of rail surface is larger than 0, which indicates that the material in contact region is in the ratcheting zone. The value of rail damage is larger than 0 according to the damage function, which means RCF crack damage. The total creep force is easy to cause the crack of which the directions are approximately perpendicular to the creep force on the rail surface, which is almost the same as the situation observed on field. With the curve radius decreasing, the total of wheel/rail creep force increases significantly. The worn wheel and rail frequently interact in the small radius curves, which is the main cause of cracking and shelling on the rail surface.

Key words: wheel-rail interaction; rail rolling contact fatigue; fatigue index; damage function; creep force

0 前言

轮轨表面损伤是铁路运输上经常出现的现象。由于地铁车辆启动/制动频繁,行车密度大,而且小半径曲线多,轮轨动态相互作用十分剧烈,滚动接触疲劳现象时有发生,至今尚未完全解决。而磨损

会影响和制约滚动接触疲劳损伤的发展。一方面,较低程度的磨损会改变轮轨型面,恶化轮轨接触关系,加剧振动和噪音,影响车辆运行的平稳性和安全性。另一方面,较大的磨损可以去掉轮轨表层裂纹,阻止其发展。随着城市轨道交通乘客运量的增大和车辆速度的提高,滚动接触疲劳现象变得越来越严重。这不仅大大增加了运营维护成本,而且直接危害行车安全。因此,揭示轮轨滚动接触疲劳损伤形成机理,预防和减缓轮轨滚动接触疲劳,显得

* 国家自然科学基金(51675444)、牵引动力国家重点实验室自主课题(2015TPL_T01)资助项目。20171215 收到初稿,20180824 收到修改稿

尤为重要。

轮轨滚动接触疲劳一直是铁路工业中难以解决的技术难题^[1]。由于轮轨间频繁的相互作用, 轮轨表层应力应变不断积累, 当达到韧性极限时材料表面开始萌生裂纹, 这种类型的裂纹与轮轨材料、载荷大小和方向有关。裂纹在轮轨力的作用下横向发展, 最终导致片状材料从轮轨表面剥离甚至钢轨断裂。滚动接触疲劳损伤的表现形式主要分为表面疲劳损伤、次表面疲劳损伤和深处疲劳损伤。材料处于棘轮效应区或者塑性安定区是导致钢轨表面裂纹形成的主要原因^[2]。

文献[3]研究了高轴重下轮轨型面对滚动接触疲劳裂纹萌生的影响, 其动力学仿真计算结果与现场观测到的结果相吻合。文献[4]仿真分析了轮轨型面和轨道几何不平顺对轮轨滚动接触疲劳和磨耗的影响。文献[5]基于磨耗数 T_y 分析在不同曲线半径、摩擦系数、轨道不平顺以及轮轨型面匹配的情况下磨耗数与安定图之间的联系, 发现在曲线处的低轨更容易损坏。文献[6]通过现场调查和分析发现, 中等半径曲线高轨无润滑处最容易发生钢轨剥离, 提出磨耗和累积的微应变或者疲劳是产生钢轨剥离的关键因素。文献[7]通过现场调查和实验分析重载铁路钢轨轨头裂纹和磨耗之间的关系, 发现一定的磨耗速率可以有效地抑制钢轨轨头裂纹的发展。文献[8]采用 JD-1 型轮轨模拟试验机, 研究了不同蠕滑率对轮轨滚动接触疲劳的影响, 认为导致轮轨踏面裂纹萌生的原因是轮轨表面之间的摩擦力和残余应力, 并提出了相应的措施来降低轮轨之间的接触应力。文献[9]分析并记录了钢轨的几种主要损伤形态的产生和后续发展状况, 揭示了其失效机理和原因, 并提出相应的预防措施。文献[10]研究了高速铁路曲线上的钢轨斜裂纹伤损状况, 认为轮轨的廓形、轨道和车辆的状态以及运行速度等是裂纹萌生的主要原因, 并针对性地提出了合理的解决钢轨表面裂纹的措施。文献[11]分析了轮轨接触力和钢轨斜裂纹的作用关系, 基于机车-轨道耦合动力学理论, 结合实际对钢轨斜裂纹现象的产生进行了深入的分析和研究, 并提出了有效的抑制或减缓钢轨表面斜裂纹萌生的技术措施, 为工程实际提供理论依据和指导。

本文针对某条地铁线路钢轨疲劳损伤问题, 建立车辆系统动力学模型, 分析大量实测轮轨型面匹配情况下车辆在三种典型曲线上运行时钢轨的受力状态、轮轨接触点位置, 以及利用基于安定图的疲劳指数和基于磨耗数的钢轨损伤函数分析钢轨表面疲劳损伤产生的原因。

1 现场调研

在调查某地铁线路时, 发现在曲线钢轨上出现明显的疲劳裂纹。在半径大于 400 m 的曲线, 疲劳裂纹主要出现在高轨轨距角处。而在小半径曲线(半径小于等于 400 m)上疲劳裂纹最严重, 甚至出现剥离掉块, 如图 1 所示。对于低轨, 裂纹主要出现在轨顶偏向外侧处; 对于高轨, 裂纹主要出现在轨距角处。图 1 中, v 表示通过该曲线时的前进方向, x 与车辆前进方向一致, y 指向车辆前进方向的右侧。

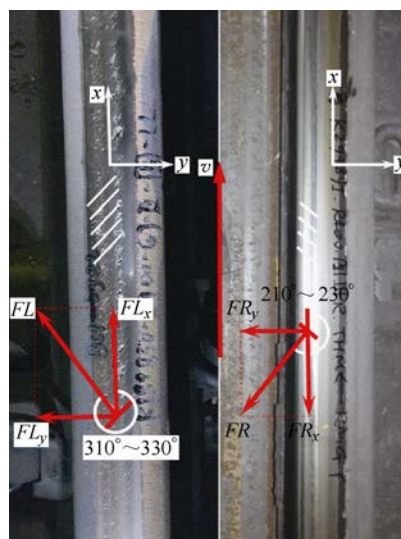


图1 半径 400 m 曲线钢轨表面状态

车辆曲线通过时轮对向外侧钢轨横移, 左右车轮产生轮径差, 内轨侧车轮的实际滚动圆半径小于名义滚动圆半径, 由纵向蠕滑率的计算公式可知^[12], 内轨侧车轮纵向蠕滑率为正值, 表示其方向与车辆前进方向相同。而纵向蠕滑力的方向和纵向蠕滑率的方向相反, 故内轨侧车轮受到一个与车辆前进方向相反的纵向蠕滑力的作用。由于钢轨和车轮的纵向蠕滑力为作用力与反作用力的关系, 即钢轨所受的纵向蠕滑力 F_{Lx} 的方向与车辆前进方向相同。外侧钢轨分析与此相同, 其受到与车辆前进方向相反的纵向蠕滑力 F_{Rx} 的作用。

轮径差使轮轨之间产生纵向蠕滑力, 而轮对的冲角则会使轮轨之间产生横向蠕滑力。车辆通过如图 1 所示曲线时轮对轴线与曲线径向方向会形成正冲角, 根据横向蠕滑率的计算公式可知, 轮对产生指向曲线内侧的横向蠕滑率, 车轮受到指向曲线外侧的横向蠕滑力的作用, 由于力的作用是相互的, 故钢轨受到一个指向曲线内侧的横向蠕滑力的作用。

现场调研时发现内外轨钢轨表面斜裂纹角度均

在 $40^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 的范围内(裂纹角度定义为裂纹与车辆前进方向的夹角)。而蠕滑力合力方向与裂纹方向相垂直是裂纹萌生的力学条件之一, 故低轨处蠕滑力合力角度应在 $310^{\circ} \sim 330^{\circ}$ 范围内, 高轨处蠕滑力合力角度应在 $210^{\circ} \sim 230^{\circ}$ 范围内(合力角度定义为合力与 x 方向的夹角)。

钢轨疲劳裂纹萌生后, 如果不能有效控制裂纹的扩展, 轻则容易形成剥离掉块, 严重时甚至会引起断轨, 威胁行车安全。钢轨出现剥离掉块等问题, 将会显著增加钢轨表面粗糙度水平, 使得轮轨滚动振动及噪声增加。此外, 还会增加轮轨冲击载荷, 进一步恶化轮轨表面状态。钢轨疲劳裂纹的形成, 受到钢轨材料属性、轮轨型面匹配、轮轨接触应力等因素的影响。为分析钢轨疲劳裂纹形成的原因, 需要获取真实的轮轨型面。

在线路调查时, 对不同半径的曲线段钢轨廓形进行了测试。实测钢轨型面见图 2, 图 2a 和图 2b 分别为对应低轨和高轨的实测型面, CN60 为 60 kg/m 标准钢轨型面, R400 m、R800 m 和 R1 000 m 分别为对应的该线路 3 种典型半径曲线圆曲线处的实测钢轨型面。由测试结果可知, 曲线处低轨磨耗点位置主要在轨顶附近, 而高轨磨耗点位置主要在内侧轨距角处。实测钢轨廓形将作为车辆系统动力学仿真的输入, 进一步分析钢轨滚动接触疲劳的形成原因。

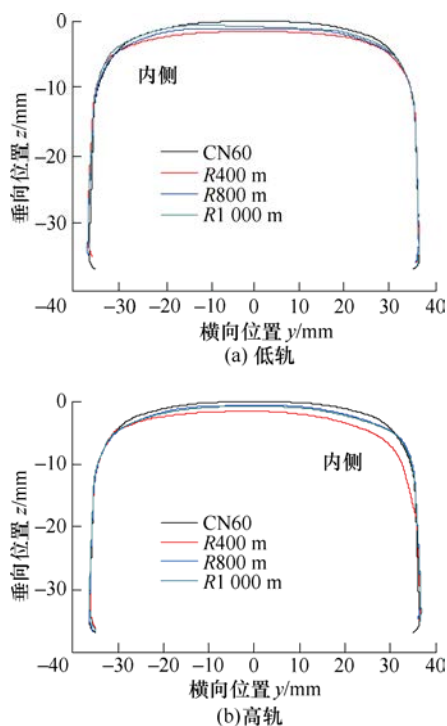


图 2 实测钢轨型面

同时对该条线路所有列车的车轮型面都进行了测量, LM 标准型面车轮采用轮缘厚度、轮缘高度、

踏面磨耗、轮缘磨耗和 Q_R 值来评价车轮的磨耗情况, 见图 3。轮缘厚度 F_T : 踏面基准线垂直向上 12 mm 距离处的轮缘厚度; 轮缘高度 F_H : 轮缘顶点到踏面基准线的垂直高度; 踏面磨耗: 在距轮背 70 mm 处标准踏面和实测踏面的高度差; 轮缘磨耗: 轮缘磨耗定义为轮缘最高点往下 15 mm 处(标准型面轮缘厚度测量点)实测型面与标准型面横坐标之差; Q_R 值: 其定义为 P_1 、 P_2 的横坐标之差。

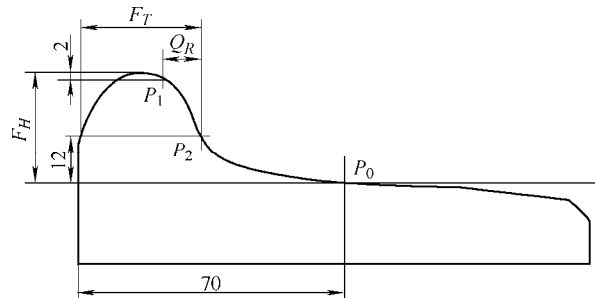


图 3 车轮参数示意图

将测试车辆车轮按照镟修和未镟修进行统计。通常轮缘厚度和轮缘高度能反应出车轮的磨耗状态, 轮缘高度和轮缘厚度随运营里程的关系分别如图 4 和图 5 所示。黑色实心点表示未镟修轮对轮缘参数, 红色空心点表示镟修轮对轮缘参数, 每个散

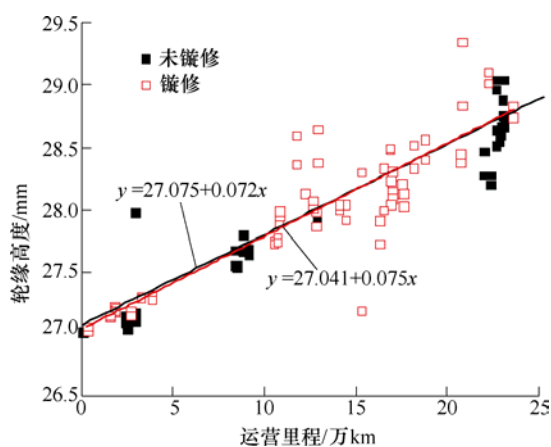


图 4 轮缘高度与行驶里程的关系

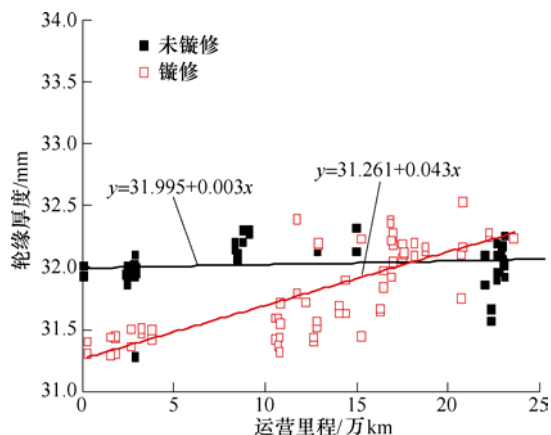


图 5 轮缘厚度与行驶里程的关系

点表示 1 节车 8 个车轮的均值。实线为对应散点的线性回归, 斜率表示速率。LM-32 标准型面的轮缘高度为 27 mm, 轮缘厚度为 32 mm。由统计结果可知, 未镟修和镟修过的车轮轮缘高度与运营里程之间呈线性增长关系, 两者增长速率基本无差别, 为 0.075 mm/万 km。对于未镟修过的车轮, 轮缘厚度基本不随里程的增加而变化, 保持在 32 mm 左右; 而采用薄轮缘镟修过的车轮轮缘厚度随着运营里程的增加而增长。典型的车轮磨损后廓形如图 6 所示。

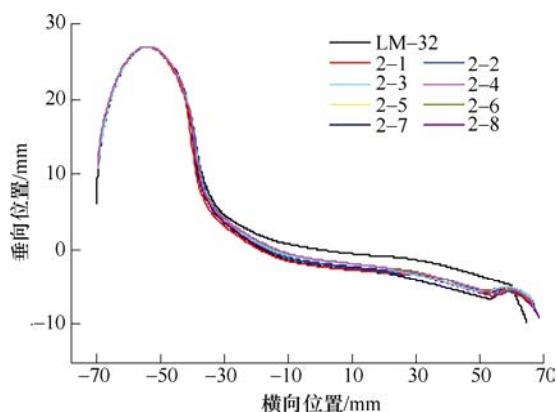


图 6 实测车轮型面

2 滚动接触疲劳模型

为了分析钢轨表面产生滚动接触疲劳损伤的原因, 首先建立地铁车辆系统动力学仿真模型, 通过输入实测的轮轨型面参数进行仿真, 得到轮轨接触各项参数, 然后将这些参数作为滚动接触疲劳模型的输入量, 分析裂纹出现的可能性。

2.1 车辆动力学模型

针对调查线路所用的 B 型地铁车辆, 利用多体动力学仿真软件 SIMPACK 建立了车辆系统动力学模型, 如图 7 所示。轮对通过一系橡胶弹簧与转向架的构架相连接, 构架与车体通过二系空气弹簧、

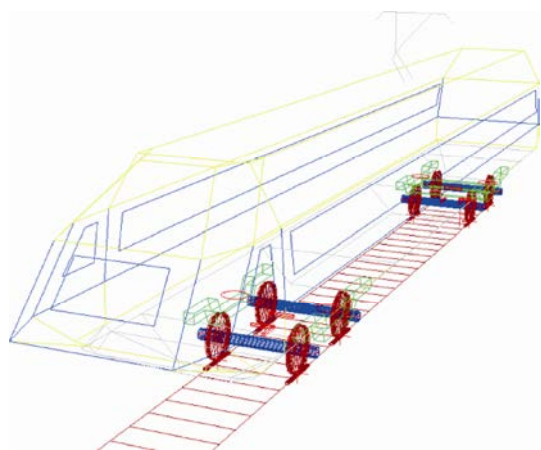


图 7 B 型地铁车辆系统动力学模型

横向减振器、牵引拉杆、横向止挡等相连接。所有的这些悬挂元件均通过弹簧-阻尼力元模拟, 考虑了减振器和横向止挡的非线性特性。模型将主要实体部件如车体、构架、轮对等均视为理想刚体, 每个刚性体均考虑 6 自由度, 整个车辆系统简化为 42 个自由度的多刚体系统。

2.2 滚动接触疲劳分析模型

本文采用的滚动接触疲劳预测模型是基于安定图的疲劳指数和基于磨损数的损伤函数。疲劳指数分析钢轨表面出现裂纹的可能性, 损伤函数分析裂纹损伤的大小。

2.2.1 表面疲劳指数

表面疲劳指数基于安定理论^[13-14], 其综合利用轮轨接触压力和切向蠕滑力来评价轮轨的承载能力, 可以快速直观地比较不同运行条件下轮轨的安全性(主要是对滚动接触疲劳), 定性分析轮轨滚动接触疲劳裂纹发生的机理及其可能性, 如图 8 所示。

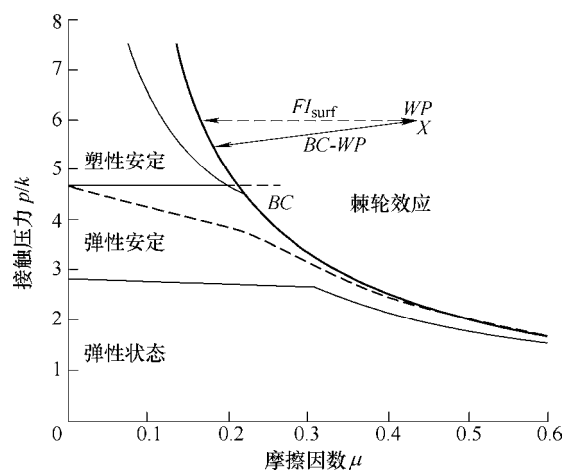


图 8 安定图

图 8 中横坐标为摩擦因数 μ , 其定义为切向力和法向力的比值

$$\mu = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} / F_n \quad (1)$$

式中, F_x 和 F_y 分别为纵向和横向蠕滑力, F_n 为法向力。纵坐标为接触压力 P 与剪切屈服强度 k 的比值。曲线 BC 为安定极限, 其右边为棘轮效应区, WP 为工作点, 工作点 WP 到安定极限 BC 的水平距离 $F_{I_{surf}}$ 即为表面疲劳指数, EKBERG 等^[14]定义了滚动接触疲劳指数

$$F_{I_{surf}} = \mu - 2\pi abk / 3F_n \quad (2)$$

式中, a 和 b 为接触斑长、短半轴。当 $F_{I_{surf}} > 0$ 时, 材料处于棘轮效应区, 材料的塑性应变会一直累积, 最终导致材料失去韧性而发生疲劳裂纹。

因表面疲劳指数是基于安定图而得到的, 采用表面疲劳指数来预测滚动接触疲劳有其不足之处:

① 疲劳指数只能用于轮轨接触斑处于全滑动状态时的计算, 对于轮轨接触斑处于部分滑动状态下没有代表性; ② 表面疲劳指数没有考虑轮轨接触蠕滑率, 蠕滑率对疲劳寿命有重要的影响; ③ 表面疲劳指数不能考虑轮轨磨损和轮轨滚动接触疲劳之间相互影响和制约的关系。

2.2.2 损伤函数

基于磨损数的损伤函数^[16]是一个常用来预测滚动接触疲劳的模型。该模型能够综合考虑轮轨横向和纵向蠕滑力以及蠕滑率对钢轨滚动接触疲劳的影响, 同时还能考虑磨损和疲劳之间相互影响和制约的关系。该疲劳预测模型基于接触斑能量耗散磨损数 T_y 的值

$$T_y = T_x \gamma_x + T_y \gamma_y \quad (3)$$

式中, T_x 和 T_y 分别为纵向和横向蠕滑力, γ_x 和 γ_y 分别为对应的蠕滑率。图 9 为钢轨滚动接触疲劳损伤函数曲线, 表 1 为对应的损伤函数参数。

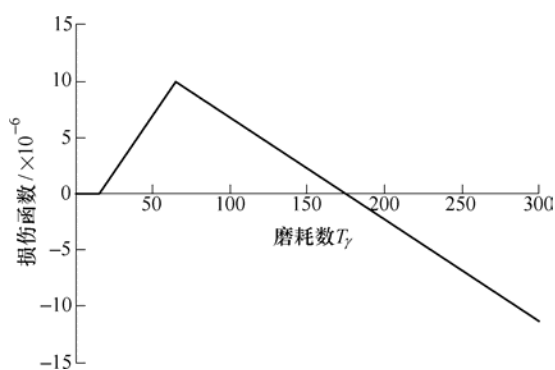


图 9 钢轨滚动接触疲劳损伤函数曲线

表 1 钢轨滚动接触疲劳损伤函数参数

损伤系数	磨损数 T_y/N	损伤函数 $1/N_f$
>0	0	0
	15	0
	65	1×10^{-5}
	175	0

只有当作用在钢轨上的纵向蠕滑力方向与车轮前进方向相反时, 钢轨疲劳损伤函数才起作用(如表 1 中损伤系数大于 0), 这时会使钢轨表面的裂纹张开。而纵向蠕滑力的方向和车轮前进方向相同时, 会使裂纹闭合, 当闭合的裂纹内部存在液体时, 由于液体的不可压缩性会加速裂纹的发展^[17]。因此, 作用在钢轨上的纵向蠕滑力方向与车轮前进方向是否相同都有可能使裂纹萌生, 但是只有当液体进入裂纹时材料才会明显的发展成为滚动接触疲劳裂纹。

使用磨损数 T_y 来计算钢轨表面疲劳损伤, 在每一

个时间步下计算接触斑上的损伤值 D_i , 用式(4)计算半椭圆的高度, 按照椭圆分布将损伤的高度 h_i 分布到接触斑的宽度 b_i 上, 再将接触斑的宽度以 0.2 mm 进行离散, 计算每一步下钢轨的滚动接触疲劳损伤。

$$h_i = D_i / \pi b_i \quad (4)$$

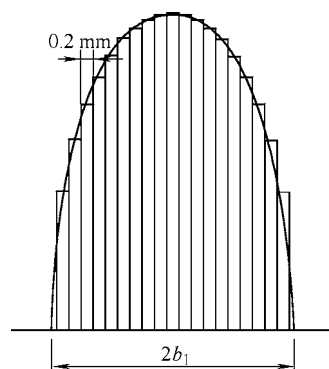


图 10 接触斑上损伤分布

3 结果分析

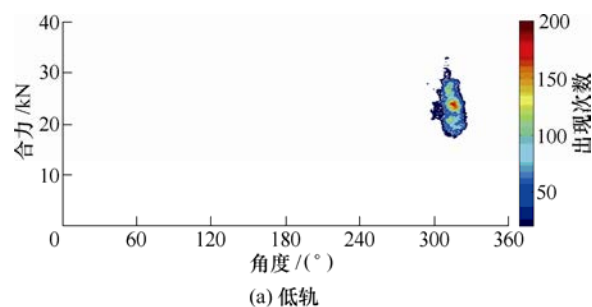
在所有调查的地铁线路中选取了 3 条出现疲劳裂纹的曲线进行分析, 曲线参数见表 2, 钢轨型面均采用实测型面。仿真计算了该线路所有实测车轮型面通过不同半径曲线时轮轨的接触点位置、轮轨蠕滑力以及滚动接触疲劳情况, 计算中考虑了钢轨不平顺的影响。

表 2 曲线参数

曲线半径/m	超高/mm	缓和曲线长/m	曲线全长/m	车速/(km/h)
400	120	65	596	60
800	76	55	285	70
1 000	62	45	230	80

3.1 钢轨表面蠕滑力合力及角度

图 11~13 分别为车辆通过半径为 400 m、800 m 和 1 000 m 的曲线时低轨和高轨蠕滑力合力大小及其角度。图中横坐标表示蠕滑力合力的角度, 其中 $0^\circ \sim 90^\circ$ 为第一象限, $90^\circ \sim 180^\circ$ 为第二象限, $180^\circ \sim 270^\circ$ 为第三象限, $270^\circ \sim 360^\circ$ 为第四象限, 纵坐标表示蠕滑力的合力, 色标表示蠕滑力合力在对应角度下出现的次数。蠕滑力合力角度的定义如图 1 所示。



(a) 低轨

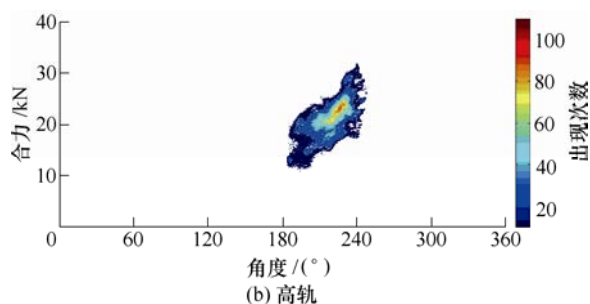


图11 半径400 m钢轨表面蠕滑力合力大小及角度

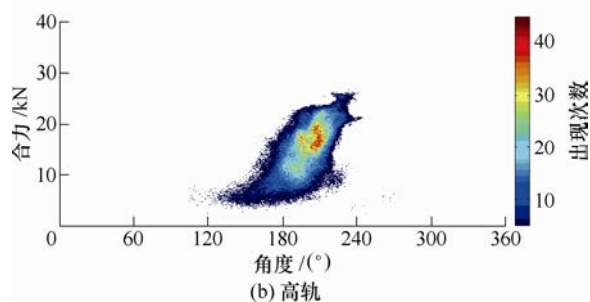
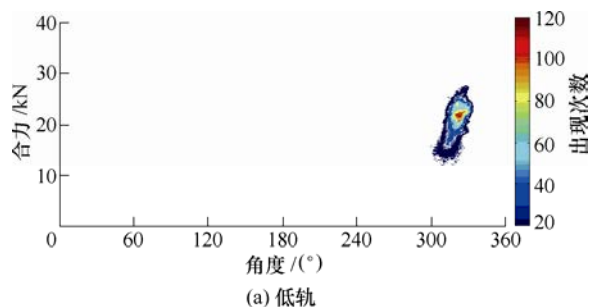


图12 半径800 m钢轨表面蠕滑力合力大小及角度

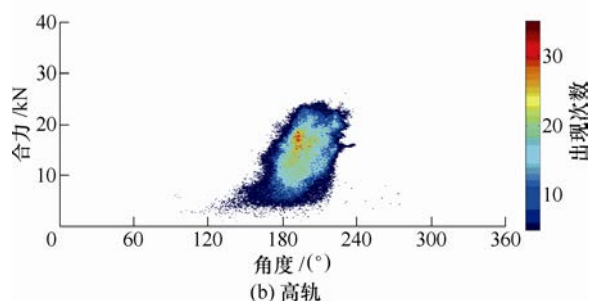
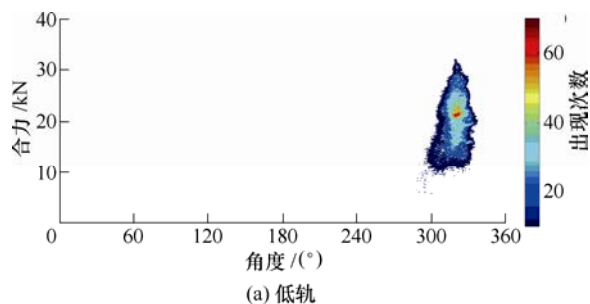


图13 半径1000 m钢轨表面蠕滑力合力大小及角度

轮轨蠕滑力的大小对轮轨磨耗和滚动接触疲劳有重要影响。由计算结果可知,随着曲线半径的减小,轮轨蠕滑力合力显著增大。蠕滑力合力角度

主要出现在第三和第四象限中。在半径为400 m的圆曲线上,低轨侧蠕滑力合力角度主要分布在 $300^{\circ}\sim 330^{\circ}$ 的范围内,处于第四象限,而高轨侧的钢轨蠕滑力合力角度主要分布在 $210^{\circ}\sim 240^{\circ}$ 的范围内,处于第三象限,容易导致钢轨表面产生与蠕滑力合力方向相垂直的裂纹,这之前理论分析结果以及现场观测到的裂纹方向相一致。在半径为800 m和1000 m的圆曲线上,低轨侧蠕滑力合力角度主要分布在 $300^{\circ}\sim 330^{\circ}$ 的范围内;而高轨侧的钢轨蠕滑力合力角度主要分布在 $180^{\circ}\sim 210^{\circ}$ 的范围内。

3.2 钢轨表面疲劳指数

图14~16分别为多个不同实测型面的车轮通过3条典型曲线的圆曲线时钢轨表面疲劳指数分布位置及轮轨接触次数。图中横坐标为钢轨的横向位置,原点即为轨顶中心,对于低轨,内侧轨距角位于横坐标30 mm附近;对于高轨,内侧轨距角位于横坐标-30 mm附近,纵坐标为钢轨表面疲劳指数 $F_{I_{surf}}$;右侧色标表示轮轨接触次数。当 $F_{I_{surf}} > 0$ 时,钢轨的轮轨接触斑材料处于安定图中棘轮效应区,材料的塑性应变会不断的积累,钢轨容易产生滚动接触疲劳损伤,当损伤值大于磨耗值时,钢轨表面开始产生疲劳裂纹,当磨耗值大于损伤值时,钢轨表面损伤材料被消耗,不会产生裂纹。

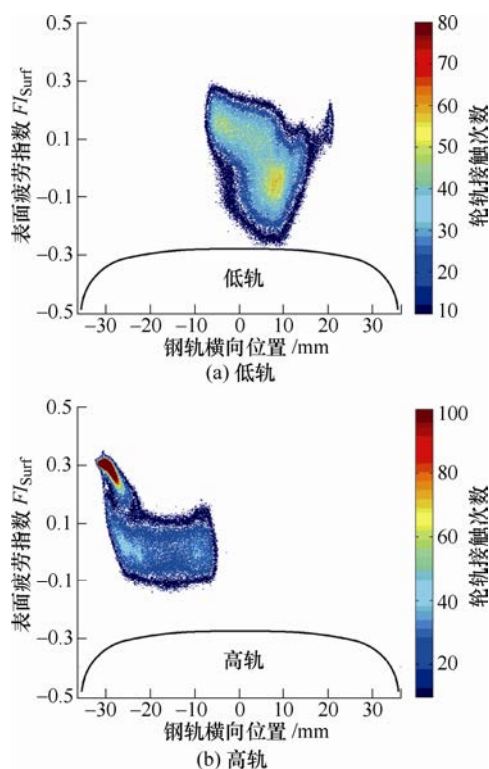


图14 半径400 m曲线钢轨表面疲劳指数

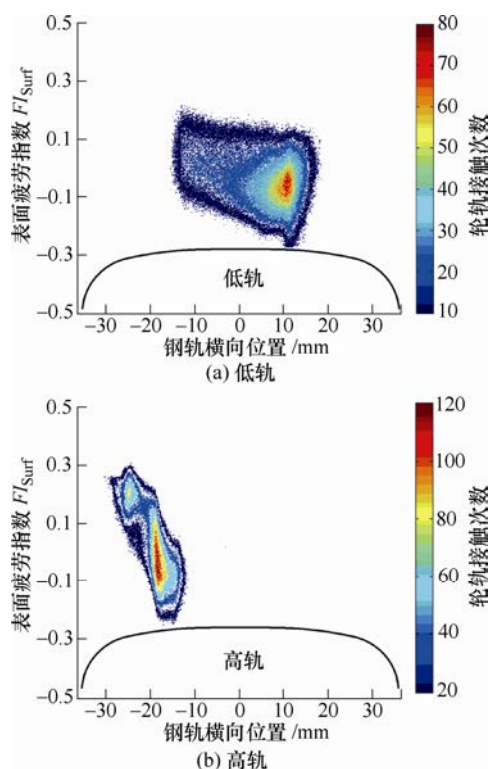


图 15 半径 800 m 曲线钢轨表面疲劳指数

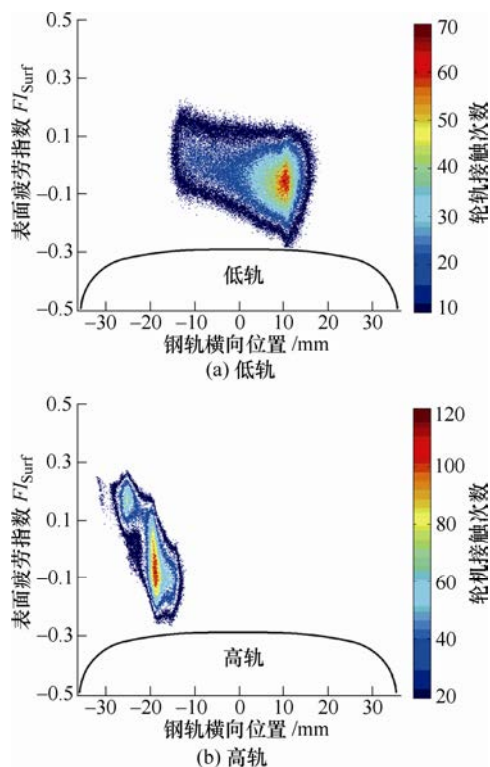


图 16 半径 1000 m 曲线钢轨表面疲劳指数

车辆通过半径为 400 m 的曲线时,由图 14 可知,低轨 $-10 \sim 10$ mm 位置处接触次数较多,且疲劳指数大于 0,而高轨大部分表面疲劳指数大于 0,且位于钢轨 -28 mm 位置(轨距角)处疲劳指数和轮轨接触次数均达到最高;说明随着车轮的不断滚过,低轨的轨顶附近和高轨的轨距角处材料易产生应力集

中,根据式(2)可知,轮轨接触应力越大,表面疲劳指数越大,越容易发生滚动接触疲劳损伤;车辆通过半径为 800 m 和 1 000 m 的圆曲线时,疲劳指数大于 0 的区域主要在高轨 $-30 \sim -20$ mm 范围内,其轮轨接触次数较高,材料内部残余应力应变不断积累,容易产生滚动接触疲劳。这与计算的车辆通过三条典型半径曲线时钢轨损伤的位置和损伤程度相一致,也与现场观察到的钢轨表面裂纹位置相符。

3.3 钢轨表面轮轨接触点位置及损伤分布

图 17~19 分别为多个不同实测型面的车轮在通过半径为 400 m、800 m 和 1 000 m 的曲线时左右侧钢轨的总损伤值及其在钢轨表面的分布情况。曲线为右曲线,左股为低轨,右股为高轨。图中横坐标为钢轨的纵向位置;纵坐标为圆曲线上钢轨的横向位置,原点为钢轨轨顶正中间的位置,上方色标表示钢轨的总损伤值,当损伤值大于 0 时,表明钢轨出现滚动接触疲劳损伤。

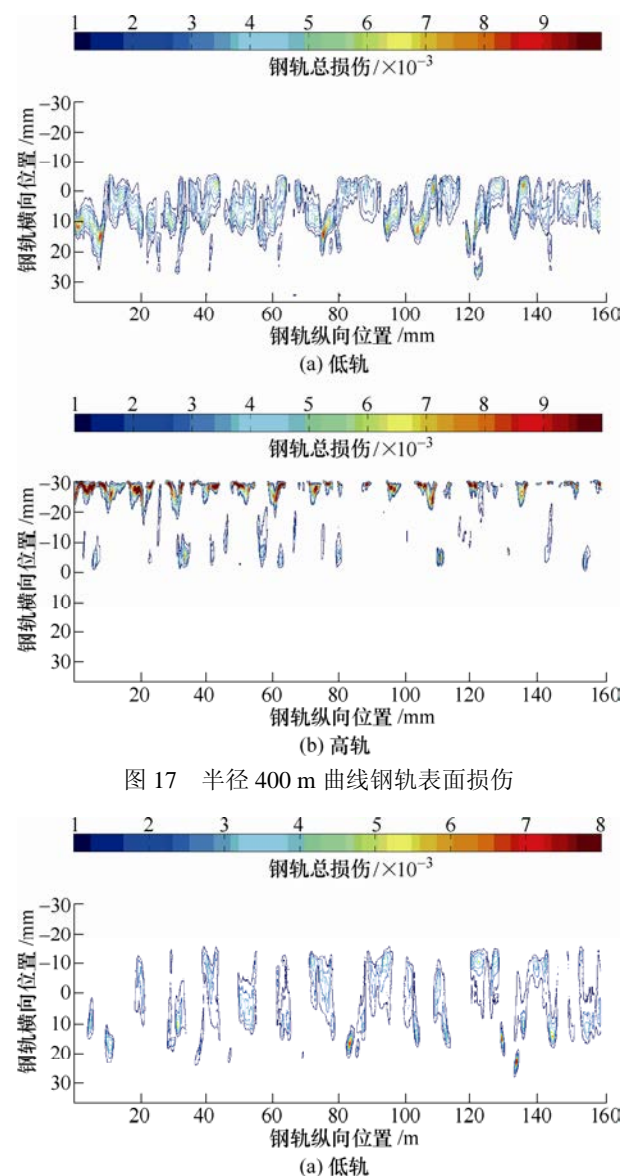


图 17 半径 400 m 曲线钢轨表面损伤

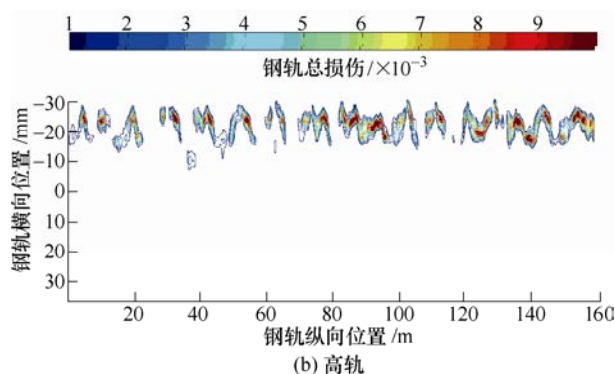


图 18 半径 800 m 曲线钢轨表面损伤

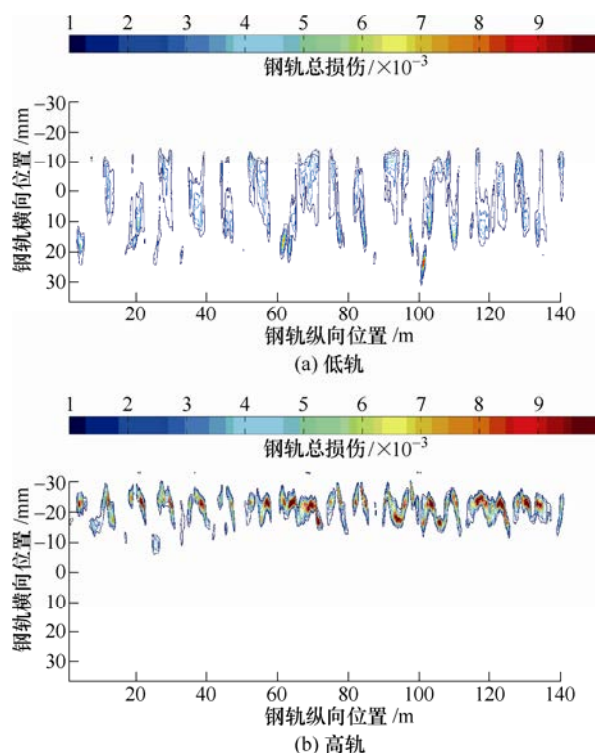


图 19 半径 1000 m 曲线钢轨表面损伤

车辆通过半径为 400 m 曲线的圆曲线时,不同型面的车轮在曲线上行驶时产生疲劳损伤的位置主要在低轨内侧 0~15 mm 范围内和高轨内侧-30~-20 mm 范围内;由于车辆曲线通过时轮对挤压外轨,高轨侧车轮轮缘根部与高轨内侧轨距角相接触;而低轨侧车轮踏面尾部与低轨轨顶附近相接触。随着车轮的不断滚过,钢轨的疲劳损伤易在低轨的轨顶附近和高轨的轨距角积累,且在低轨内侧 10 mm 和高轨内侧-28 mm 处疲劳损伤达到最大值。车辆通过半径为 800 m 和 1 000 m 曲线的圆曲线时,钢轨上的轮轨接触点位置主要在低轨 0 mm 和高轨内侧-25 mm 附近波动。高轨的轨距角和低轨的轨顶附近出现疲劳损伤,其出现的位置与现场观测到的裂纹及剥离掉块出现的位置相一致。

4 结论

建立了包含地铁车辆系统动力学模型、基于安定图的疲劳指数和基于磨耗数的损伤函数为一体的钢轨滚动接触疲劳预测模型。从轮轨接触位置、蠕滑力大小及方向、钢轨接触斑材料的疲劳响应,以及磨耗与疲劳之间的竞争关系等方面分析了地铁钢轨滚动接触疲劳形成的原因,得到以下研究结论:

(1) 随着曲线半径的减小,轮轨蠕滑力合力显著增大,在半径为 400 m 的圆曲线上,低轨侧钢轨的蠕滑力合力角度在 $300^{\circ}\sim 330^{\circ}$ 的范围内,处于第四象限;而高轨侧的钢轨蠕滑力合力角度在 $210^{\circ}\sim 240^{\circ}$ 的范围内,处于第三象限;半径为 800 m 和 1 000 m 的曲线低轨蠕滑力合力角度在 $300^{\circ}\sim 330^{\circ}$ 范围内,高轨蠕滑力合力角度在 $180^{\circ}\sim 210^{\circ}$ 范围内。若在钢轨表面形成疲劳裂纹,则裂纹的角度将于蠕滑力合力的角度相垂直。

(2) 车辆通过半径小于 1 000 m 的圆曲线时,高轨接触点主要分布在轨距角附近,疲劳指数普遍大于 0,钢轨材料处于棘轮效应区,通过损伤函数计算得到的累积损伤结果表明该处钢轨属于疲劳损伤,容易在高轨轨距角处萌生与列车前进方向成 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 的疲劳裂纹;车辆通过半径为 400 m 的圆曲线时,低轨容易在轨顶附近萌生与列车前进方向成 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 的疲劳裂纹,而在半径大于 800 m 的曲线,在低轨萌生疲劳裂纹的可能性较小。

(3) 预测得到的钢轨疲劳裂纹出现的可能性、位置和角度均与现场观测得到的结果相一致。本文数值模拟方法和结果可为车轮镟修周期的制定和钢轨打磨廓形的设计提供一定的参考,更好的制定地铁线路钢轨表面滚动接触疲劳治理措施。

参 考 文 献

- [1] 金学松,沈志云. 轮轨滚动接触疲劳问题研究的最新进展[J]. 铁道学报, 2001, 23(2): 92-108.
JIN Xuesong, SHEN Zhiyun. Rolling contact fatigue of wheel/rail and its advanced research progress[J]. Journal of the China Railway Society, 2001, 23(2): 92-108.
- [2] RINGSBERG J W. Rolling contact fatigue of railway rails with emphasis on crack initiation[D]. Göteborg: Chalmers University of Technology, 2000.
- [3] FRÖHLING R, SPANGENBERG U, HETTASCH G. Wheel/rail contact geometry assessment to limit rolling contact fatigue initiation at high axle loads[J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50(Suppl.): 319-334.

- [4] KALLE K. Influence of rail, wheel and track geometries on wheel and rail degradation[D]. Göteborg: Chalmers University of Technology, 2015.
- [5] PELIN B, ADAM B, ANDY V. Prediction of RCF damage on underground metro lines[C/CD]// First International Conference on Rail Transportation, July 10-12, 2017, Chengdu.
- [6] MATSUDA H, SATOH Y, KANEMATSU Y, et al. On-site investigation and analysis of damage leading to rail break[J]. *Wear*, 2011, 271(1): 168-173.
- [7] ZHOU Yu, WANG Shaofeng, WANG Tianyi, et al. Field and laboratory investigation of the relationship between rail head check and wear in a heavy-haul railway[J]. *Wear*, 2014, 315(1-2): 68-77.
- [8] 郭俊. 轮轨滚动接触疲劳损伤机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- GUO Jun. Study on mechanism of wheel/rail rolling contact fatigue and damage[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [9] 卢观健, 杨克. 钢轨伤损的形貌特征及其失效机理[J]. *铁道学报*, 1996, 18(3): 120-124.
- LU Guanjian, YANG Ke. Morphology and failure mechanism of rail damage[J]. *Journal of the China Railway Society*, 1996, 18(3): 120-124.
- [10] 刘学文, 邹定强, 邢丽贤, 等. 钢轨踏面斜裂纹伤损原因及对策的研究[J]. *中国铁道科学*, 2004, 25(2): 82-87.
- LU Xuewen, ZHOU Dingqiang, XING Lixian, et al. Study on the causes and Countermeasures of rail tread slanting crack[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2004, 25(2): 82-87.
- [11] 熊嘉阳. 钢轨斜裂纹形成机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- XIONG Jiayang. Study on the formative mechanism of rail oblique crack[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [12] 金学松, 刘启跃. 轮轨摩擦学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
- JIN Xuesong, LIU Qiyue. *Tribology of wheel and rail*[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004.
- [13] BOWER A F, JOHNSON K L. Plastic flow and shakedown of rail surface in repeated wheel-rail contact[J]. *Wear*, 1991, 144(1): 1-18.
- [14] JOHNSON K L. The strength of surfaces in rolling contact[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1989, 203(203): 151-163.
- [15] EKBERG A, KABO E, ANDERSSON H. An engineering model for prediction of rolling contact fatigue of railway wheels[J]. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 2002, 25(10): 899-909.
- [16] JOHN T, JOHN S, JAVIER P. The development of a wheel and rolling contact fatigue model[R]. RSSB Report for Task T549, 2007.
- [17] FLECHER D J, HYDE P, KAPOOR A. Modelling and full-scale trials to investigate fluid pressurization of rolling contact fatigue cracks[J]. *Wear*, 2008, 265(1): 1317-1324.
-
- 作者简介: 梁喜仁, 男, 1992 年出生。主要研究方向为滚动接触疲劳。
E-mail: 605156724@qq.com
陶功权, 男, 1989 年出生, 博士研究生。主要研究方向为轮轨磨耗和滚动接触疲劳。
E-mail: gq_tao@163.com
温泽峰(通信作者), 男, 1976 年出生, 博士, 研究员, 博士研究生导师。主要研究方向为轮轨关系。
E-mail: zfwen@home.swjtu.edu.cn